

용접 변형 연구 동향

강 성 구^{*,†} · 양 종 수^{*}

*STX조선해양 기술연구소 재료용접기술팀

Overview of Research Works Regarding Welding Distortion

Sung-ku Kang^{*,†} and Jong-soo Yang^{*}

*Welding/Material R&D Team, Research Institute of Technology

†Corresponding author : skkang@onestx.com

1. 서 론

용접입열에 의한 용융 및 응고과정에서 용접부에 수축이 발생하고, 이로부터 변형 및 잔류응력이 발생한다. 용접 변형은 구조물 치수 정밀도에 영향을 미칠 뿐만 아니라 제품의 가치를 저하시킨다. 실제로 조선소에서 용접 입열로 인한 변형은 선각 변형 발생 원인의 대부분을 차지하고 있다.

선각 변형 발생원인은 크게 3가지로 분류할 수 있다. 첫번째는 위에서 언급한 용접 변형으로 전체 변형 원인의 70% 정도를 차지하는 것으로 알려져 있다. 용접 시 입열이 적절하지 못하여 불량 취부 및 습관적인 각장 증가로 인해서 발생하는 것이 대부분이다. 변형 발생 부위는 선수미, Engine Room, 중앙부의 박판 구조에 많이 발생하는 것으로 알려져 있다. 두번째는 절단 변형으로서 10% 정도를 차지한다. 절단 입열에 의해서 발생하는 것이 대부분이다. 마지막으로 탑재 불량으로 20% 정도를 차지한다. 무리한 탑재로 인해서 발생하는 경우가 많다.

이러한 변형을 교정하기 위해서 많은 시수와 시간이 소요되고 있는 실정이다.

용접 구조물 설계 시 변형 예측하여 설계에 반영하거나 변형을 제어함으로써 막대한 비용을 절감할 수 있다. 이러한 목적으로 변형관련 많은 연구들이 수행되어 왔다.

용접 변형 관련 연구는 여러 분야로 분류할 수 있다. 본 논문에서는 용접 변형 해석 기법 및 용접 변형 제어 기법으로 구분하였다. 이와 관련된 현재까지의 연구 동향 및 관련 중요 논문에 대해서 기술하였다.

2. 용접 변형 해석 기법

2.1 열탄소성 해석

용접 변형 해석하는 첫번째 방법은 열탄소성 해석이다. 용접 입열량을 입력으로 주면 열전도 방정식과 온도차에 의한 열변형도로부터 탄소성 해석이 이루어진다. 해석 결과로서 응력, 변형 등을 제공하여 준다. 상대적으로 정확한 결과를 제공해 주는 것으로 알려져 있다. 단점으로는 대형구조물 모델링이 쉽지 않으며, 해석 시간이 상당히 오래 걸리는 것으로 알려져 있다.

열탄소성 해석 연구는 기본적인 부재 즉 맞대기 용접, 필릿 용접 등에서 각변형, 횡수축 용접 변형에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다. 최근에는 다양한 용접 기법에 대한 입열 모델 개발 등의 연구가 진행되고 있다. 관련 세부적인 연구는 다음과 같다.

FCAW와 레이저 하이브리드 용접 기법에 따른 박판 용접부의 좌굴 변형 거동 특성에 대한 연구가 진행되었다¹⁾. 이를 위하여 용접 입열 모델을 개발하였다. 용접 기법 별 용접 변형과 용접 수축 하중에 대한 예측 기법을 제안하였고 좌굴 변형 거동 특성을 비교 평가하였다. Fig. 1은 용접 시 주판 각변형이 FCA에 의한 단속 필릿 용접, 하이브리드 편면 용접, FCA 편면 그리고, 양면 용접 순으로 증가하는 것을 보여주고 있다.

레이저 용접에 의한 알루미늄 박판 구조물 용접 변형에 대한 해석이 진행되었다²⁾. 관(Tube)형태의 Al5052 Sheet에 대하여 실험을 수행하고, Fig. 2와 같은 열원 모델과 변형 해석 모델을 검증하였다. 관형 구조물의 형상 및 크기, 용접선의 위치에 따른 용접 변형의 크기

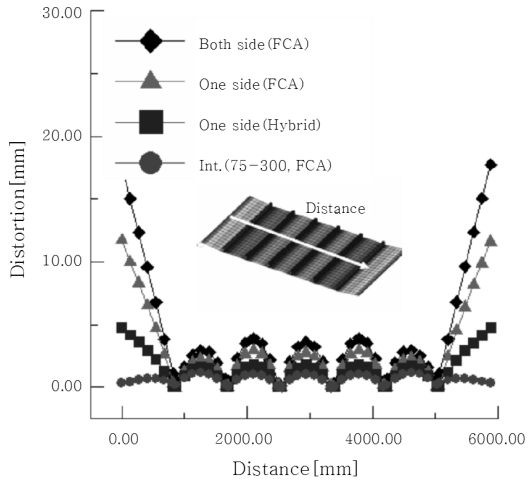


Fig. 1 Deformation profiles of the welded thin panel as function of welding processes

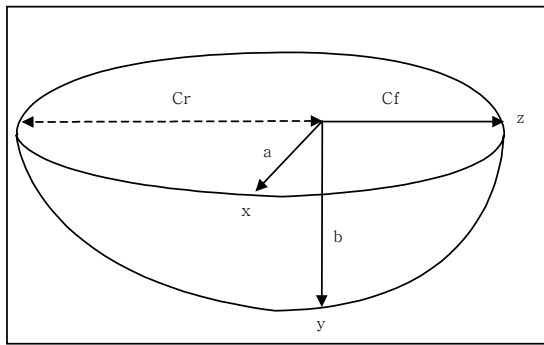


Fig. 2 Goldak's double ellipsoidal shaped weld heat source model

및 양상을 분석함으로써 알루미늄 판재 구조물의 용접 변형에 대한 기초자료를 제공하였다.

다층 양면 개선 용접부의 각변형을 제어하기 위한 적정 개선 형상 설계 방안을 정립하고자 다층 양면 개선 용접부의 각 변형 예측 기법에 대한 연구가 진행되었다³⁾. 이를 위하여 단순 맞대기 용접부에 대한 각변형의 주인자와 용접적층에 따른 변형 거동 특성을 규명하고, 실험 결과와 비교함으로써 변형 예측 기법의 타당성을 검증하였다. Fig. 3은 SAW에 대한 해석과 실험값을 보여 주는 예이다.

SM490A강의 용접 시 발생하는 용접변형을 예측하기 위하여 유전적 알고리즘(GA, Genetic Algorithm) 기반의 입열 모델이 개발되었다⁴⁾. Fig. 4와 같이 MATLAB의 GA Toolbox를 이용하여 최적 입열 모델을 선정하기 위한 시스템을 구현하였다. Fig. 5는 구현된 입열 모델의 최적 용접 조건 선정 예를 나타낸다.

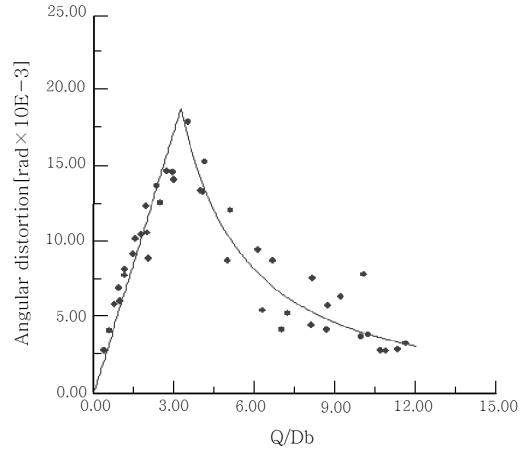


Fig. 3 Variation of the angular distortion at the butt weldment

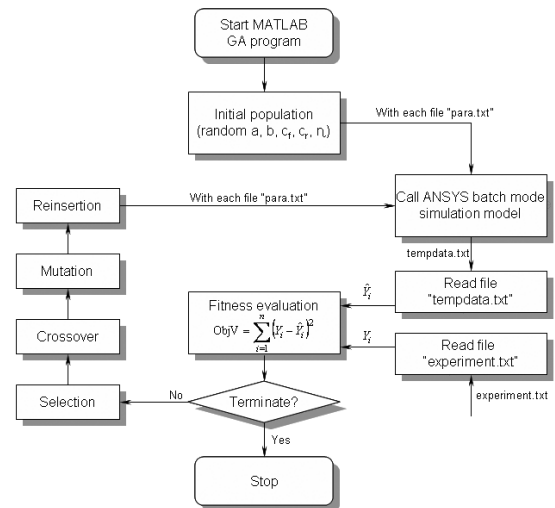


Fig. 4 Schematic diagram of genetic algorithm for selecting the optimal shape parameters using heat input model

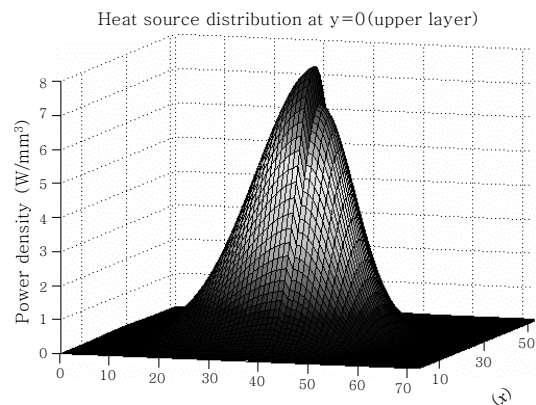


Fig. 5 Decision of optimized heat input model (170A, 32.9V, 300mm/min)

2.2 등가하중법

해석시간이 많이 소요되는 열탄소성 해석을 대신하기 위한 등가하중법에 대한 연구가 1990년대부터 진행되어 왔다. 등가하중법은 용접 실험 변형으로부터, 혹은 구조물에 발생하는 고유변형도로부터 등가 하중을 계산하고, 이를 구조물에 부가하여 용접 변형을 계산하는 방식이다. 해석시간이 탄성해석과 동일한 장점을 가지고 있다.

등가하중법의 빠른 해석 속도를 활용한 Shell 요소로 된 선체 구조물 해석이 많이 진행되어 왔다. 고유변형도관련 상변태, 냉각방법, 하드닝 등을 고려하는 연구가 진행되어 왔으며, 고유변형도를 가상 물성치로 사용하는 연구도 진행되고 있다. 세부적인 연구 내용은 다음과 같다.

고유변형도 이론과 유한 요소 해석을 결합한 효율적인 변형예측 기법에 대한 연구가 진행되었다⁵⁾. Fig. 6과 같이 구속도와 온도에 따른 고유변형도를 구하였고, 이를 이용하여 Fig. 7과 같은 간단한 선체 블록에 적용할 수 있음을 확인하였다.

복수의 동일한 용접구조물에 대하여 변형률 경계법을 사용하여 열변형을 해석할 시에, 각 구조물의 용접 순서를 다르게 하여 최종 열변형이 상이하게 만들어 지는 상황에 대한 해석이 진행되었다⁶⁾. 해석 경향이 실제와 유사한 지를 평가하기 위하여, 동일한 형상을 가진 6개의 구조물을 Fig. 8과 같이 다른 순서로 용접하는 실험을 통하여, 제안된 해석법의 결과들의 변형 정도 차이가 실험간의 순서와 유사함을 확인하였다.

2차원 열탄소성 해석과정에서 구한 Fig. 9와 같은 고유변형률 분포로부터 등가의 수축력과 모멘트를 구하고 이를 대상 구조물에 외력으로 작용시켜서 탄성해석을 수행하는 등가하중법을 이용하여 판 부재들의 용접 변형을 예측하는 연구가 진행되었다⁷⁾. 해석 대상은 평판 맞대기 용접, 용접선 방향으로 곡률이 있는 곡판의 비드 용접이다. 특히 곡률의 크기와 부호를 변화시켜서

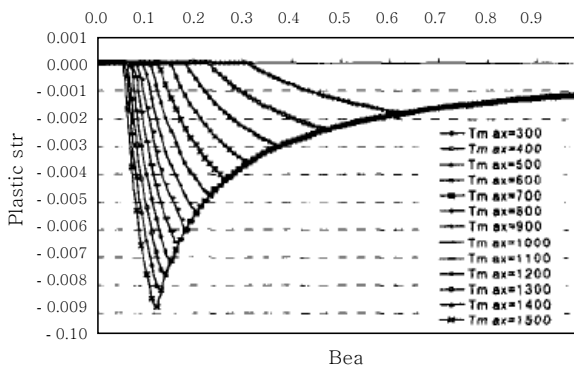


Fig. 6 Residual plastic strain

수행한 곡판의 비드 용접 해석 결과를 통해 용접선 방향으로의 곡률이 용접변형에 주는 영향을 분석하였다.

고유변형도 기반 금속 Hardening을 고려하여 보다

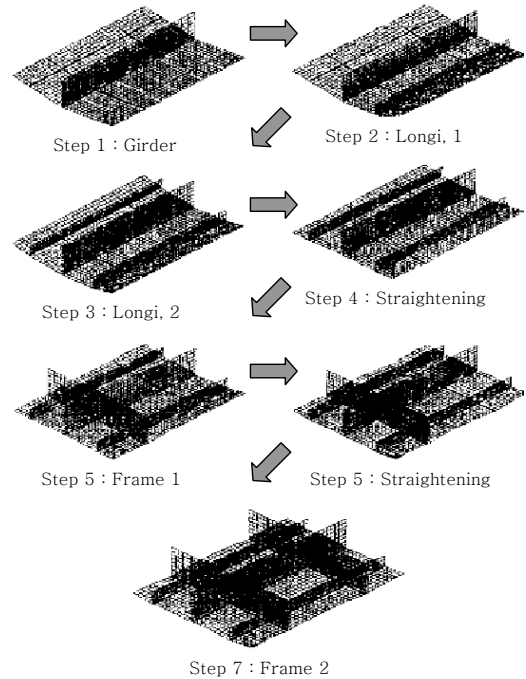


Fig. 7 Welding deformation of each fabrication step

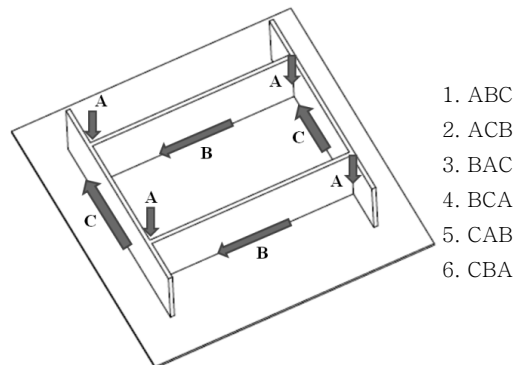


Fig. 8 Workable welding sequence diagram

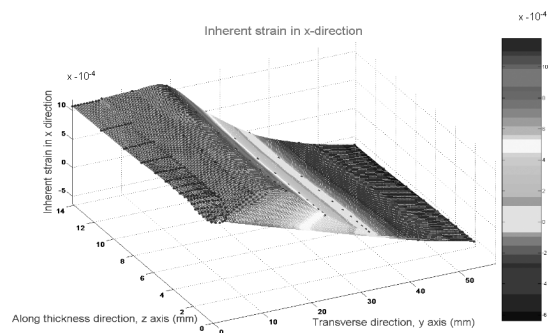


Fig. 9 Distribution of inherent strain

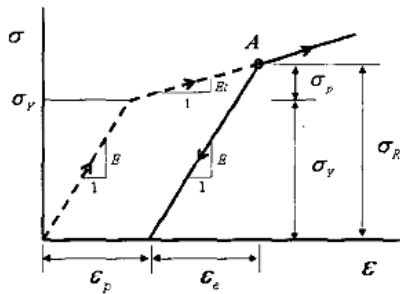


Fig. 10 Stress-Strain Diagram considering the hardening

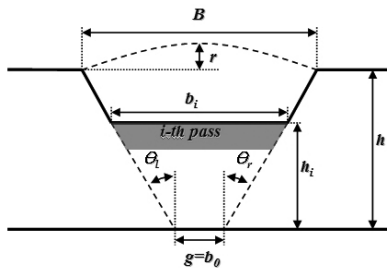


Fig. 11 The standard section of multi-pass butt-welding

정확한 잔류응력에 기반한 변형을 예측하는 연구가 수행되었다⁸⁾. 고유변형도 전개 과정에서부터 Fig. 10과 같이 Hardening을 고려한 유도과정을 소개하고, 제안된 변형도식의 유용성을 검증할 수 있는 용접판의 하중부하-제하 시의 판 변형 측정 실험을 수행하였다.

셀요소를 사용하여 해석 입력인자가 패스 수를 반영하도록 하는 연구가 진행되었다⁹⁾. Fig. 11과 같이 80mm 50여 패스 맞대기 용접에 대해 해석과 실험을 수행하여 타당성을 검증하였다.

2.3 용접 실험을 통한 분석

용접 실험을 통한 변형 분석은 쉽게 접근할 수 있는 방법이다. 필요한 형상에 대해 직업 용접을 수행하고 용접 변형을 측정하면 되는 간단한 점이 존재한다. 단점으로는 복잡한 대형 구조물에 대한 실험을 수행하기가 어렵다는 것이다. 몇번의 경우에 대해서 결과를 도출하기에는 충분한 실험을 진행해야 하는데 비용 및 시간이 많이 소요된다. 이러한 방식으로 접근하기 위해서는 비교적 간단한 형상에 대해서 진행하는 경우가 많이 존재한다.

필릿 용접구조물의 좌굴 변형에 관한 연구가 진행되었다¹⁰⁾. 단일 비드 온 플레이트 용접과 필릿 용접에서의 좌굴변형모드 구분과 좌굴변형량에 대해 정량적인 방법을 제시하기 위해 싱글 비드 온 플레이트 마그

Tab. 1 Distortion and welds shape with various welding speed

DSB	welding speed (cpm)	Welds shape	Distortion (mm), type
∞	30		19.0, U
	60		14.0, U
	90		13.0, ∩
	120		11.0, ∩
	150		12.0, ∩
30	30		7.5, U
	60		7.2, U
	90		7.2, U
	120		6.0, U
	150		5.0, U

(MAG) 필스 용접에서 용접 조건과 구속조건, 냉각조건 및 용접순서에 따른 좌굴변형과 필릿용접에서의 변형형태와 변형량을 측정하여 특징을 구분하고 정량화시켰다.

3. 용접 변형 제어 기법

용접 변형을 제어하는 다양한 방법이 존재한다. 대표적인 변형 제어법은 Kawasaki Heavy Industries 정리하였는데 면외변형 제어를 대상으로 하였다. 3가지 방법을 제시하였으며 세부 내용은 다음과 같다. 첫째 방법은 강재가 용접 중일 때 기계적으로 인장하중을 주는 방식으로 SS Method(Straightening by stretching)로 명칭된다. 두번째 방법은 정해진 온도로 강재를 가열하는 방법으로 SH Method(Straightening by heating)이라고 한다. 세번째 방법은 인장력과 온도를 동시에 가하는 방법으로 SSH Method(Straightening by stretching and heating)이다. 이와 유사한 개념으로 역변형법 등이 존재한다.

현재까지 진행되어온 용접 변형 제어 연구들은 위에서 언급한 개념에 기초하고 있다. 이와 관련된 논문들은 다음과 같다.

인장법을 박판 필릿 용접에 적용하였을 때 변형 제어에 어느 정도의 효과가 있는지에 대한 분석이 진행되었다¹¹⁾. 인장력 크기와 방향 및 판 두께를 변화시킨 여러 조건에서 필릿 용접 실험을 수행하였다. 인장력 크기와 방향이 좌굴 변형 감소에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. Fig. 12는 인장력을 가하는 방향에 대해서 보여주고 있으며, Fig. 13은 인장력이 증가함에 따라 변형이 감소하는 것을 보여주고 있다.

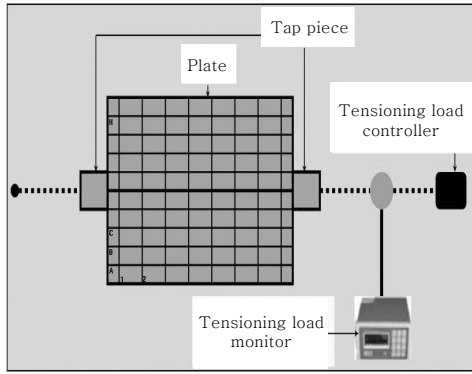


Fig. 12 Arrangement of experiment apparatus

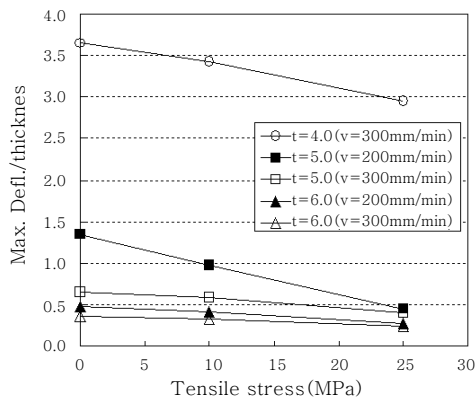


Fig. 13 Change of maximum deflection to tensile stress : Tensile load in weld direction

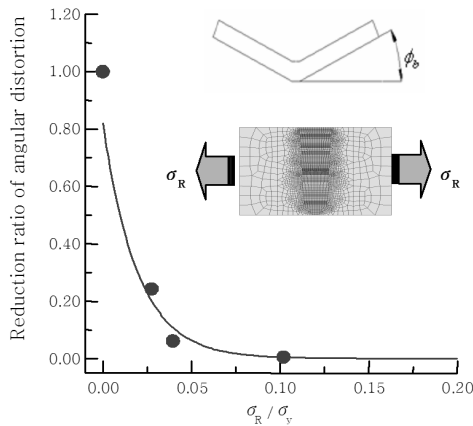


Fig. 14 Changes of welding distortion at the multi-pass STS 304 butt weldment under tension load

STS 304강을 이용한 진공용기의 제작 시 효율적인 변형 제어를 위한 연구가 진행되었다¹²⁾. STS 304 맞대기 다층 용접부에서 발생하는 용접 변형 제어를 위해 인장법 적용 가능성을 유한 유한요소해석을 이용하여 평가하고자 하였다. Fig. 14는 해석 결과를 보여주고 있으며 인장력이 증가할수록 각변형이 감소하는 것을

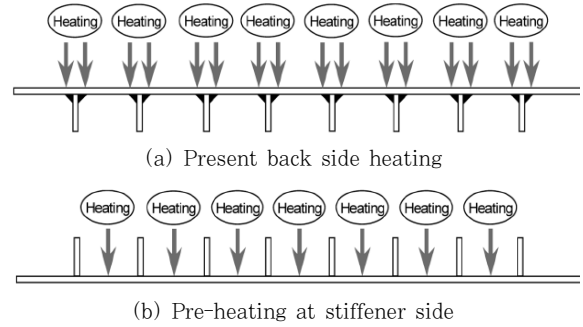


Fig. 15 Basic concept of plastic counter-deforming method

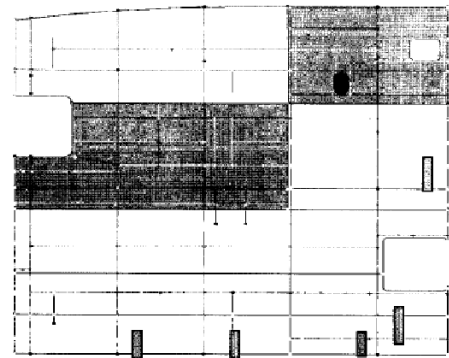


Fig. 16 Final recommended points of carling

보여주고 있다.

박판 블록 용접변형 최소화를 위해 선상가열을 이용한 소성 역변형법을 Fig. 15와 같이 제시하였고, 타당성이 수치해석을 통해 검증되었다¹³⁾. 이를 토대로 여객선 갑판 블록의 작업 공법을 판두께 별로 표준화하였고, 이로부터 보강재 사이의 각변형을 줄이고자 하였다.

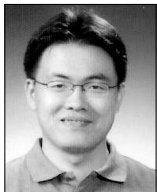
대조 단계와 탑재 단계 사이에 존재하는 공정인 블록 리프팅에 의한 응력 분포가 대조 단계에서 이루어진 곡직의 효율을 떨어뜨릴 수 있는 가능성을 고유변형도를 기반으로 하여 파악하는 연구가 진행되었다¹⁴⁾. 곡직 효율이 저하될 것이라고 판단되는 곳에 Fig. 16과 같이 Carling을 시공하여 면의 변형을 방지하고자 하였다.

4. 맺 음 말

용접 변형 연구에 대한 개략적인 흐름과 연구 사례 등을 살펴보았다. 현재까지는 간단한 형상에서의 용접 구조물에서 발생하는 용접 변형 예측 및 제어에 초점이 맞추어진 연구가 대부분을 차지하고 있다. 대형구조물 용접변형을 예측 및 제어하고자 하는 연구가 최근에 많이 시도되고 있지만 아직은 미흡한 수준인 것으로 사료된다. 이에 대한 연구자들의 신속하고 지속적이며 심도 있는 연구 활동을 기대한다.

참 고 문 헌

1. Sang-beom Shin, Dong-ju Lee and Joo-sung Lee : Evaluation of Buckling Distortion for the Thin Panel Welded Structure According to Welding Processes, Journal of KWJS, **26-3** (2008), 237-243 (in Korean)
2. Ki-bo Kwon, Jae-woong Kim and Cheol-Hee Kim : Analysis of Welding Distortion for Laser Welded Sheet Metal Structures of Aluminum Alloy, Journal of KWJS, **27-3** (2009), 276-283 (in Korean)
3. Sang-beom Shin and Joong-geun Youn : A Study on the Angular Distortion Prediction of Double Sided Multi-pass Butt Weldment, Journal of KWJS, **25-1**(2007), 37-41 (in Korean)
4. Ill-soo Kim, Hak-hyoung Kim, Han-kee Jang, Hee-jin Kim, Sung-kyu Kwak, Hoi-soo Ryoo and Ji-yeon Shim : A Study about Analysis of Weld Distortion using Genetic Algorithm, Journal of KWJS, **27-4** (2009), 398-403 (in Korean)
5. C.D. Jang and C.H. Lee : A Study on the Prediction and Control of Welding Deformations of Ship Hull Blocks, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, **37-2** (2000), 127-136 (in Korean)
6. Yun-sok Ha : A Study on Weldment Boundary Condition for Elasto-Plastic Thermal Distortion Analysis of Large Welded Structures, Journal of KWJS, **29-4** (2011), 410-415 (in Korean)
7. Joo-sung Lee : Welding Deformation Analysis of Plates Using the Inherent Strain-based Equivalent Load Method, Journal of KWJS, **28-2** (2010), 159-166 (in Korean)
8. Jong-tae Kim, Yun-sok Ha and Chang-doo Jang : Analysis of Post Weld Deformation at HAZ by External Forces Based on Inherent Strain, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, **43-2** (2006), 220-227 (in Korean)
9. Yun-sok Ha, and Jin-hyuk Yang : Development of Distortion Analysis Method for Multi-pass Butt-welding Based on Shell Element, Journal of KWJS, **28-1** (2010), 54-59 (in Korean)
10. Hwan-su Chu, and Sang-myung Cho : A Study on the Buckling in Fillet Welds of Sheets, Journal of KWJS, **27-3** (2009), 292-298 (in Korean)
11. Joo-sung Lee, and Cheul-ho Kim : A Study on the Fillet Weld-Induced Deformation Control by Applying the Tensioning Method, Journal of KWJS, **27-4** (2009), 382-387 (in Korean)
12. Ha-geun Kim, Dong-ju Lee and Sang-beom Shin : A Study on the Distortion Control Characteristics of the STS 304 Multi-pass Butt Weldment by Tensioning Method, Journal of KWJS, **28-3** (2010), 301-306 (in Korean)
13. Sang-il Kim : Control of Welding Distortion for Thin Panel Block Structure Using Plastic Counter-Deforming Method, Journal of the Korea Committee for Ocean Resources and Engineering, **23-2** (2009), 87-91 (in Korean)
14. Yun-sok Ha, Seok-hee Won and Myung-su Yi : A Study for Remained Efficiency of Correction Heating After Block Lifting, Special Issue of the Society of Naval Architects of Korea, (2008), 118-125 (in Korean)



- 강 성 구
- 1973년생
- STX조선 기술연구소 재료용접기술팀
- 용접변형
- e-mail : skkang@onestx.com



- 양 종 수
- 1961년생
- STX조선 기술연구소 재료용접기술팀
- 용접공정 및 용접자동화
- e-mail : yjs9451@onestx.com